

Seminarieuppsatser nr 185

# Den arktiska permafrostens degradering och metangasutsläpp

***Boel Hedgren***

---

2010  
Institutionen för geo- och ekosystemvetenskaper  
Enheten för naturgeografi och ekosystemanalys  
Lunds Universitet  
Sölvegatan 12  
223 62 Lund





# DEN ARKTISKA PERMAFROSTENS DEGRADERING OCH METANGASUTSLÄPP

---

EN KANDIDATUPPSATS AV:

BOEL HEDGREN

HANDLEDARE:  
ANDERS LINDROTH

INSTITUTIONEN FÖR GEO- OCH EKOSYSTEMVETENSKAPER  
ENHETEN FÖR NATURGEOGRAFI OCH EKOSYSTEMANALYS, LUNDS UNIVERSITET  
VÅREN 2010



## **Förord**

Denna kandidatuppsats, omfattande 15 högskolepoäng, är skriven vid institutionen för geo- och ekosystemvetenskaper, enheten för naturgeografi och ekosystemanalys, vid Lunds Universitet våren 2010.

Jag vill rikta ett tack till min handledare, Anders Lindroth, för uppmuntran och konstruktiv kritik under arbetets gång.



## **Abstract**

According to temperature data for the past 157 years, the global mean temperature is increasing with an accelerating rate in the end of the 20th century. Climate models that have been developed on research centers around the world all show a warming trend the next coming 100 years. They also show that the increase in temperature will occur earlier and be more intense over the Arctic region.

In the northern hemisphere permafrost covers an area of 23 million km<sup>2</sup>. The main factor for the existence and degradation of permafrost is the atmospheric climate. However, regional factors such as precipitation, vegetation and snow cover also have some impact.

The Arctic soil contains about 14% of the global storage of soil carbon. When the permafrost thaws, the carbon is released as methane gas in an anaerobic decomposition. Since methane has a *GWP* (Global Warming Potential) of 23, i.e. is a 23 times stronger greenhouse gas than carbon dioxide, an increase in emission means a threat to the climate.

Methane also exists as methane hydrates, which are frozen compounds consisting of a methane molecule surrounded by water molecules. These are formed at low temperatures and high pressure. The estimates of the size of the pool of methane hydrate differ. Older estimates say 8-700 Gt carbon while newer estimates say 5-195 Gt.

Research results show that around 100 Gt of carbon will be released from thawing permafrost before year 2100. The largest emissions is expected to come from Siberia (40 Gt) and Canada (48 Gt). As emissions from methane hydrates probably require more warming before it becomes significant, the emissions from this source are more uncertain.

## **Keywords:**

*Geography, physical geography, permafrost, degradation, methane, greenhouse gases*





## Populärvetenskaplig sammanfattning

Temperaturdata från de senaste 157 åren visar att jorden genomgår en uppvärmning. Forskare runt om i världen är eniga om att den globala medeltemperaturen även kommer att fortsätta öka de närmsta 100 åren. Dock är temperaturförändringen inte jämt fördelad över jordklotet; den arktiska regionen tros stå inför en snabbare och mer intensiv uppvärmning.

Den arktiska regionen är till stora delar täckt av frusen mark, s.k. *permafrost*. Permafrostens existens beror främst på det atmosfäriska klimatet, men också på regionala faktorer så som nederbörd, snötäcke och vegetation. Vid en större förändring i den globala medeltemperaturen finns alltså risken att permafrosten börjar tina.

Just den arktiska jorden innehåller stora mängder kol, närmare bestämt 14% av det kol som finns lagrat i jord globalt. När permafrosten tinar frigörs metangas vid syrefri nedbrytning som sker i den våtmark som bildas. Metangas är en 23 gånger kraftigare växthusgas än vad koldioxid är, vilket gör att den utgör ett stort hot mot vårt klimat.

Forskningsresultat visar att tinande permafrost kommer att släppa ut 100 miljarder ton kol inom de närmsta 100 åren, där de största utsläppen tros komma ifrån Sibirien och Kanada.

**Nyckelord:** *Geografi, naturgeografi, permafrost, degradering, metan, växthusgaser*



## Innehållsförteckning

<b>1 INLEDNING</b> .....	13
<b>2 SYFTE OCH METOD</b> .....	14
<b>3 BAKGRUND</b> .....	14
3.1 DEN ARKTISKA REGIONEN .....	14
3.2 KLIMATFÖRÄNDRINGEN .....	14
3.2.1 GLOBALA FÖRÄNDRINGAR .....	14
3.2.2 FÖRÄNDRINGAR ÖVER DEN ARKTISKA REGIONEN .....	15
3.2.3 ARKTIS FRAMTIDA KLIMAT .....	15
3.3 PERMAFROST .....	17
3.3.1 UTBREDNING .....	18
3.3.2 DEGRADERING .....	19
3.4 METANGAS OCH KOLRESERVOARER .....	21
3.4.1 METANGAS .....	21
3.4.2 METANCYKELN .....	21
3.4.3 KOLRESERVOARER .....	22
3.4.4 YEDOMA .....	22
<b>4 RESULTAT</b> .....	22
4.1 HISTORISKA OCH NUTIDA UTSLÄPP .....	23
4.2 FRAMTIDA UTSLÄPP .....	24
4.3 KONSEKVENSER .....	24
<b>5 DISKUSSION OCH SLUTSATSER</b> .....	25
<b>6 REFERENSLISTA</b> .....	28
6.1 TRYCKTA KÄLLOR .....	28
6.2 ELEKTRONISKA KÄLLOR .....	30
6.3 FIGURER .....	31



## 1 Inledning

Sedan ett och ett halvt århundrade tillbaka har jordens medeltemperatur visat en trend uppåt. Denna ökande trend har skett i takt med industrialiseringen som började i mitten av 1800-talet, det vill säga gått hand i hand med ökade utsläpp av växthusgaser. Temperaturökningen har varit allt mer tilltagande under slutet av 1900-talet och förväntas bli ännu kraftigare under de nästkommande 100 åren.

Är det då bara antropogena utsläpp som orsakar denna uppvärmning? Nej, så enkelt är det inte. Ett varmare klimat kan tillsammans med andra processer i våra ekosystem skapa så kallade positiva återkopplingsprocesser. Detta kan till exempel vara att ett minskande snötäcke ger ett ökat albedo som i sin tur gör att mer energi absorberas vilket leder till en högre temperatur. Eller så kan det vara vad just denna rapport handlar om: utsläpp av metangas ifrån tinnande permafrost.

Den arktiska regionen är till stor del täckt av permafrost, det vill säga permanent frusen mark. Den arktiska jorden innehåller även ovanligt mycket kol; bra mycket mer än vad andra, ofrusna mineraljordar gör. När permafrosten tinar frigörs detta kol i form av metangas vid anaerob nedbrytning. Då metangas är en 23 gånger starkare växthusgas än vad koldioxid är innebär detta utsläpp ett bidrag till växthuseffekten och ett hot mot vårt klimat.

Detta klimathot som vi står inför skulle kunna liknas vid att cykla utan bromsar: ett varmare klimat frigör mer metan, som ger ett varmare klimat, som frigör mer metan...

Denna rapport sammanställer forskningsresultat rörande den arktiska permafrostens degradering samt historiska och framtida utsläpp av metangas.

## 2 Syfte och metod

Syftet med denna kandidatuppsats är att med hjälp av insamlad litteratur och data, från tryckta och elektroniska källor, besvara följande frågeställningar:

- Hur ser permafrostens utbredning ut och hur avtar den?
- Hur stora är kolreservoarerna i permafrosten?
- Hur ser kopplingen ut mellan permafrostens tinande och utsläppen av metan?

Insamlat material sammanställs sedan i en litteraturstudie i form av bakgrund och resultat, och avslutas sedan med egna tankar och värderingar i diskussionsform.

## 3 Bakgrund

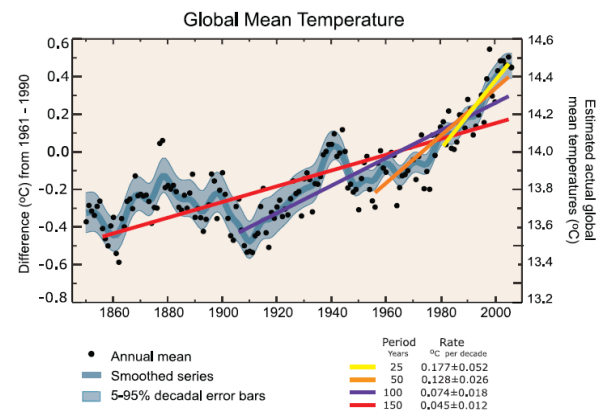
### 3.1 Den arktiska regionen

Det finns två olika sätt att se på hur den arktiska regionen ska avgränsas (Hassol, 2004). Den ena varianten är väldigt precis och menar att det är området innanför polcirkeln, det vill säga det område som ligger norr om den latitud där solen inte går ner under horisonten vid sommarsolståndet och inte upp över den vid vintersolståndet. Den andra varianten väger istället in trädgränser, klimatologiska gränser, permafrostutbredning och havsisens utbredning. Detta gör att regionen istället avgränsas med geografisk och klimatologisk hänsyn. Dock behandlas området väldigt flexibelt då även subarktiska områden ofta inkluderas. Sett ur denna synvinkel spänner sig den arktiska regionen över såväl is, tundra och subarktisk barrskog. I denna rapport kommer den senare definitionen av regionens avgränsningar att användas, eftersom även den subarktiska regionen innehåller stora delar permafrost.

### 3.2 Klimatförändringen

#### 3.2.1 Globala förändringar

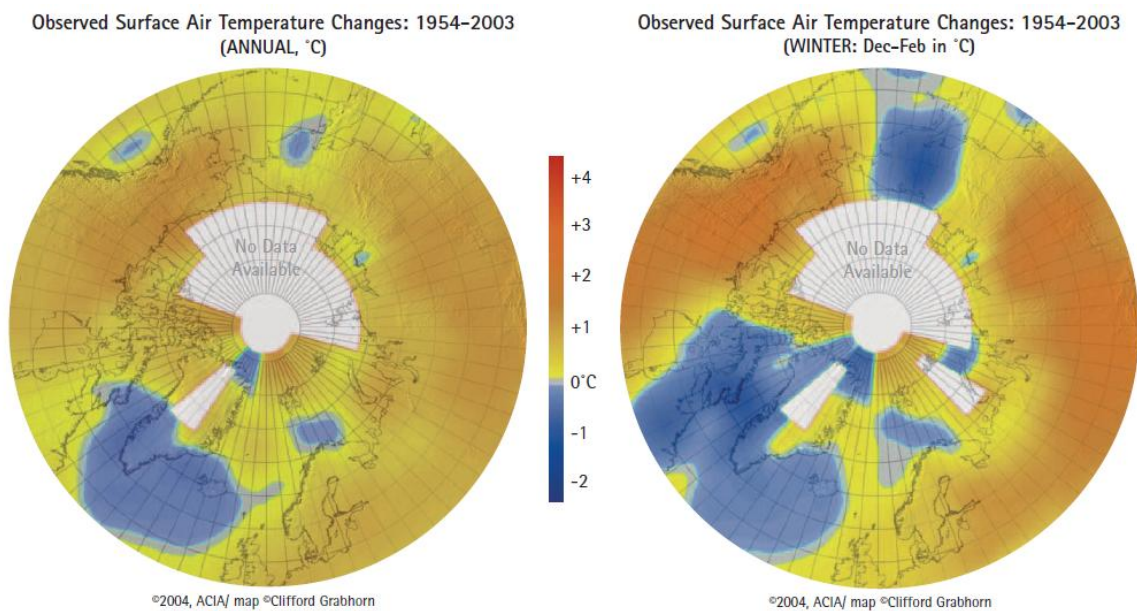
Mätdata för de senaste 157 åren visar att jordens medeltemperatur ökar samt att ökningen tilltagit under slutet av 1900-talet (Trenberth *et al*, 2007) (se Figur 1). Detta kan illustreras med det faktum att 11 av de 12 varmaste åren som registrerats har ägt rum de senaste 12 åren (1995-2006). Dock har ökningen inte varit jämn vare sig över årstider eller över jordklotet då den största ökningen har skett under vintern samt över land.



Figur 1 Förändring i den globala medeltemperaturen, 1856-2005. (IPCC: Trenberth, K.E. et al, 2007)

### 3.2.2 Förändringar över den arktiska regionen

Data över bl.a. ökad temperatur och tinande permafrost är några bevis på den allt mer tilltagande uppvärmningen av den arktiska regionen. Det råder även regionala skillnader i temperaturförändringen: vissa områden indikerar på temperaturökningar och andra, bland annat Grönland, på temperaturminskningar (ACIA, 2004a). Dock kvarstår det faktum att den Arktiska regionen generellt sett genomgår en uppvärmning. Även här identifieras samma säsongsbundna trender där vinterhalvåret visar på större temperaturökning än resten av året (*se Figur 2*). Som exempel har vintertemperaturen i Alaska och västra Kanada ökat med 3-4°C under de senaste 50 åren.



**Figur 2** Förändring i medeltemperatur över Arktis, 1954-2003. Tv: årsmedeltemperatur, th: vintermedeltemperatur (ACIA, 2004a, *Key Finding 1*)

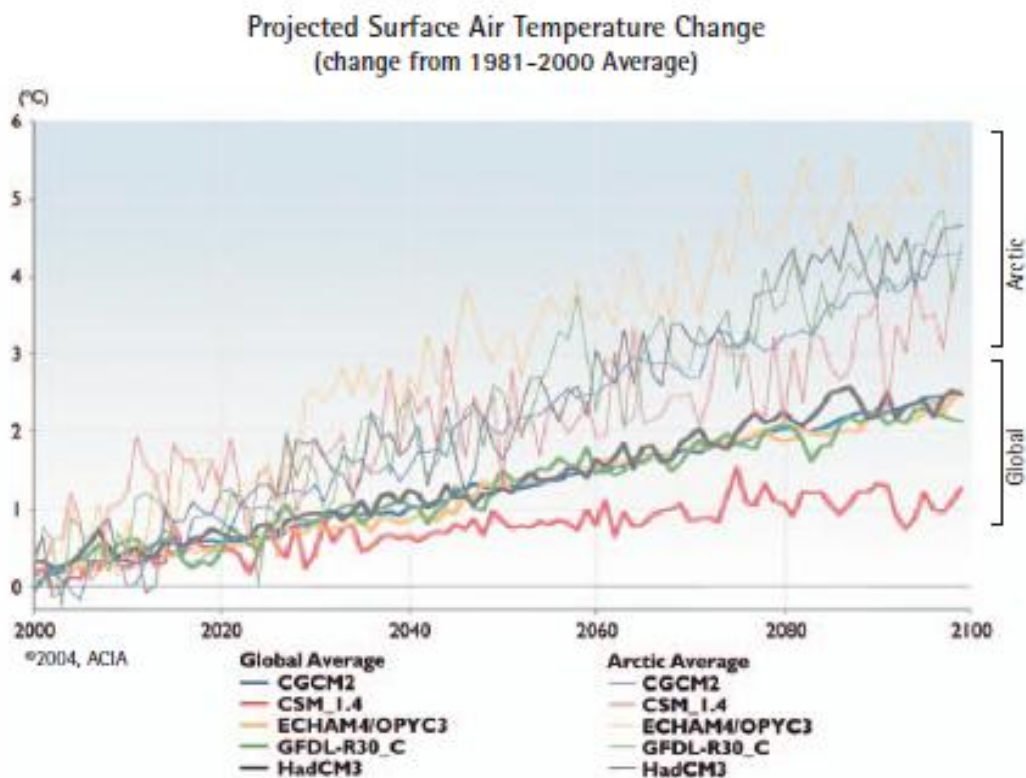
Data från borrhävar från is visar att den uppvärmning som kan ses idag skiljer sig starkt vad gäller hastighet och storlek från historiska klimatförhållanden. Anledningen till denna anomali tros ha både antropogen och naturlig orsak, där den antropogena påverkan är utsläpp av växthusgaser och den naturliga påverkan från bland annat vulkanutbrott, variationer i solinstrålning samt växelverkan mellan atmosfär och hav (ACIA, 2004a).

### 3.2.3 Arktis framtida klimat

För att kunna uppskatta framtida klimatförändringar har IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) tagit fram en beskrivning över potentiella utsläppsscenarier (*Special Report*

on *Emission Scenarios*, SRES). Det finns totalt 40 olika scenarier som härstammar från fyra grundscenarier, så kallade ”familjer”: A1, A2, B1 och B2 (Nakic´enovic´, N. *et al*, 2000). De olika familjerna skiljer sig genom att bland annat olika ekonomisk tillväxt, befolkningstillväxt och energiförbrukning antas samt att dessa faktorer värderas olika. Dock viktas inte scenarierna mot varandra, det vill säga inget scenario anses vara mer troligt än de övriga.

Olika forskningscenter runt om i världen har utvecklat olika klimatmodeller. Trots att processerna som beskriver klimatsystemets respons på utsläppen skiljer sig modellerna i mellan, så visar de alla på en värmande trend de närmsta 100 åren, om än i olika grad (ACIA, 2004a). Även om det lägsta utsläppsscenarioet används tillsammans med den klimatmodell som visar minst påverkan vid förändring i atmosfärens sammansättning, visar ändå resultatet på en dubbel så hög temperaturökning detta århundrade än förra. Vidare visar modellerna att tempera-

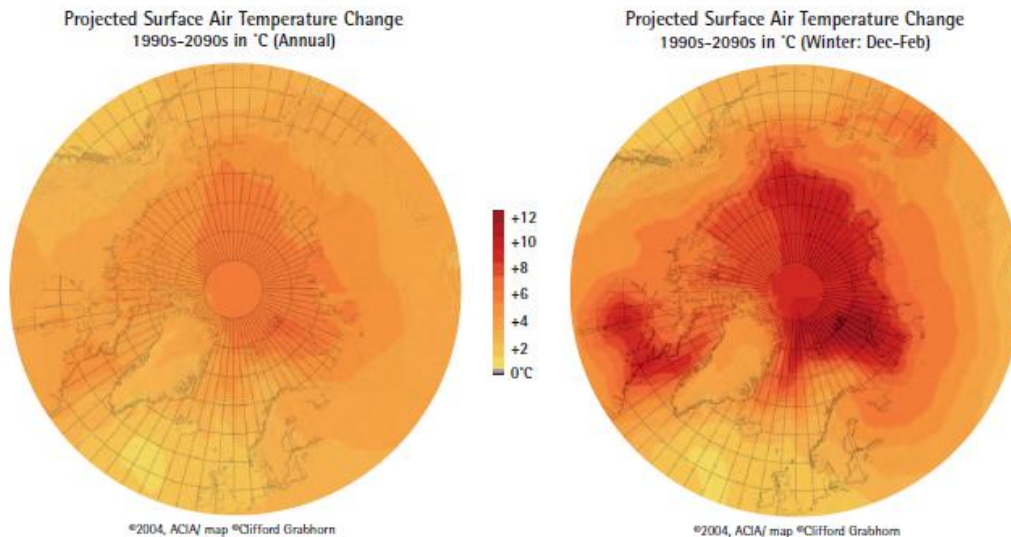


**Figur 3** Projicerad temperaturdata från utsläppsscenario B2 samt fem olika klimatmodeller. Feta linjer motsvarar global medeltemperatur och tunna arktisk medeltemperatur. (ACIA, 2004a, Key Finding 1)

turökningen över Arktis kommer att ske tidigare, snabbare och bli avsevärt högre än det globala medelvärdet. ACIA (*Arctic Climate Impact Assessment*) har med hjälp av SRES B2-scenarioet samt modeller från fem av världens ledande klimatforskningscenter tagit fram en



projektion av den temperaturförändring Arktis står inför<sup>\*1</sup>. Projektionen åskådliggör temperaturförändringen mellan 1990-2090 och visar mot slutet av 2000-talet en ökning på 1-2 °C globalt och 3-5 °C över Arktis (se Figur 3). För att åskådliggöra regionala skillnader projiceras även temperaturdata i kartform (se Figur 4).



**Figur 4** Projicerad temperaturdata från medelvärdet av utsläppsscenario B2 samt fem olika klimatmodeller. Tv: Årsmedeltemperatur 1990-2090, Th: Vintermedeltemperatur 1990-2090. (ACIA, 2004a, *Key Finding 1*)

### 3.3 Permafrost

Permafrost definieras som den jord under markytan som har en temperatur under 0°C i minst två år i rad (Anisimov och Reneva, 2006) och bildas när marken kyls tillräckligt mycket under vintern för att förbli frusen under resten av året (Geological Survey of Canada, 2007). Ovanpå permafrosten ligger det aktiva lagret som tinar under sommaren för att sedan frysa igen under vintern (Lemke *et al*, 2007). Det är i detta lager som ekologiska processer sker och dess tjocklek påverkas bland annat av markens fuktighet och temperatur. Förändring i lagrets tjocklek påverkas dock, när de övriga faktorerna förblir konstanta, av den globala uppvärmningen.

Det huvudsakliga avgörandet för att permafrost ska kunna existera är det atmosfäriska klimatet (Geological Survey of Canada, 2007). Dock påverkas även permafrosten av lokala varia-

<sup>\*1</sup> Resultatet visar varken värsta eller bästa tänkbara utfall, utan snarare ett resultat något under medelvärdet för klimatmodellernas temperaturprojektioner. Att fokus lagts på SRES B2-scenariot (se Bilaga) beror på praktiska begränsningar för rapporten och inte p.g.a. att detta skulle vara mer troligt än övriga scenarier.

tioner i marktemperatur. Marktemperaturen är beroende av bland annat vegetation och snötäcke och påverkar permafrostens djup, temperatur och utbredning. När marktemperaturen ökar så ökar det aktiva lagret i tjocklek medan permafrosten minskar. Denna påverkan har dock en fördröjning då det finns en viss dämpning i marken på grund av vegetation, snötäcke etc. (Geological Survey of Canada, 2007). Detta medför att vid en förändring av lufttemperaturen kan det ta upp emot tusentals år för tjock permafrost och tiotals år för tunn permafrost att påverkas.

### 3.3.1 Utbredning

På norra hemisfären täcker permafrosten ca 23 miljoner km<sup>2</sup> (Lemke *et al*, 2007) och ca 17% av denna är diskontinuerlig (Jorgenson *et al*, 2001) (se *Figur 5*). Permafrost brukar delas in i tre klasser efter dess utbredning i landskapet: kontinuerlig (90-100%), diskontinuerlig (50-90%) samt sporadisk (0-50%) (International Permafrost Association, 2010). Tjockleken på permafrost varierar stort beroende på område och typ. I Sibirien kan permafrosten nå djup på 1500 m medan den i norra Alaska som mest uppnår ett djup på ungefär 740 m. Motsvarande skillnader för de olika klasserna är 800-1000 m för kontinuerlig, 25-100 m för diskontinuerlig samt 10-50 m för sporadisk permafrost (Anisimov och Reneva, 2006).



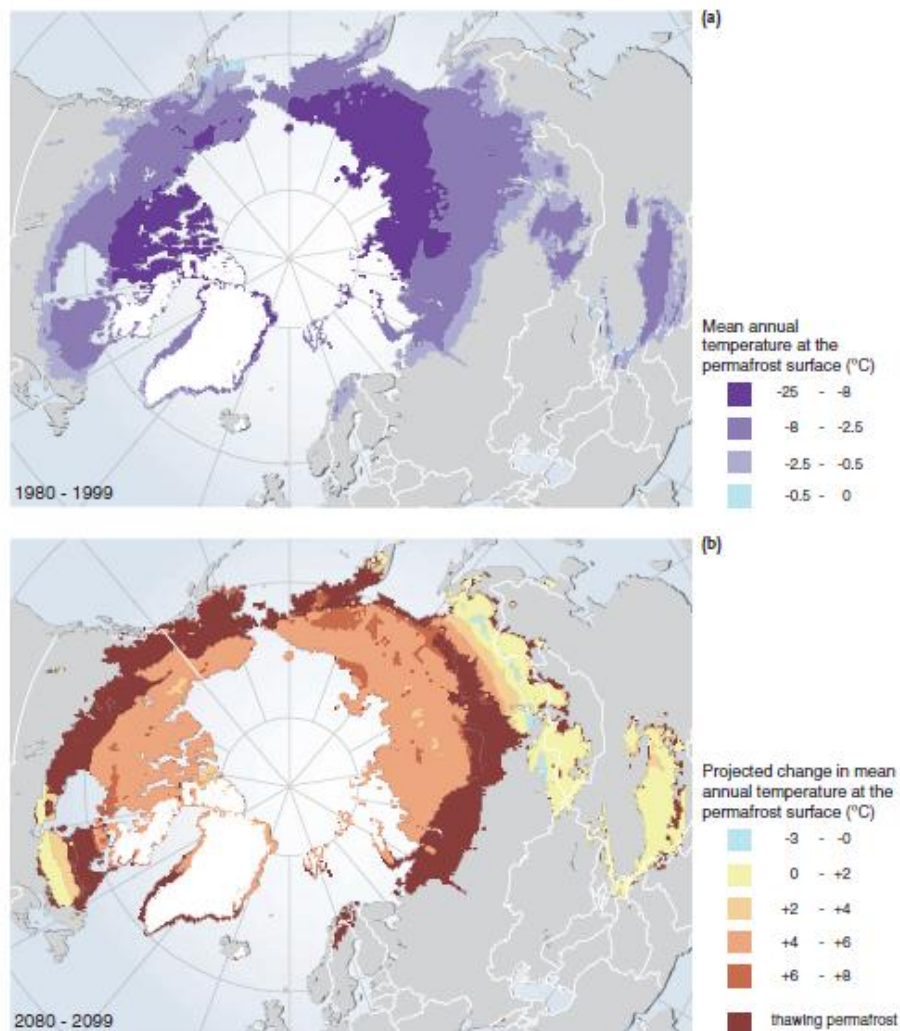
Figure 7.1. Permafrost extent in the Northern Hemisphere.

Source: Based on Brown and others 1997<sup>1</sup>

**Figur 5** Permafrostens utbredning på norra hemisfären. Observera att diskontinuerlig och sporadisk permafrost här klassas som en och samma typ. (UNEP: Romanovsky, V.E. et al, 2008, *Frozen Ground*, The Global Outlook for Ice and Snow, United Nations Environment Programme)

### 3.3.2 Degradering

Den förändring i jordens klimat som ägt rum de senaste 150 åren har enligt fältstudier och modelleringar varit tillräckligt stor för att påverka degraderingen, det vill säga avtagandet, av permafrost (Jorgenson *et al*, 2001). Den diskontinuerliga permafrosten är på grund av sin tunna tjocklek mest känslig för den globala uppvärmningen (Jorgenson *et al*, 2001) och enligt Anisimov och Nelson (1996) skulle den diskontinuerliga permafrostens utbredning minska med 24-28% vid en temperaturförändring på 2°C. Vidare visar en amerikansk klimatmodell, framtagen av GFDL (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) och baserad på B2-scenariot, att den totala ytan av permafrost kommer att ha minskat med 11% vid år 2030, 18% vid år 2050 samt 23% vid år 2080 (Anisimov och Reneva, 2006).



**Figur 6** Övre bilden: Permafrostens medeltemperatur på norra hemisfären under perioden 1980-1999. Undre bilden: Framtida projicerad temperaturförändring jämfört med 1980-1999. Klimatmodell för 2000-talets klimattillstånd: MIT 2D (Sokolov, A.P. and Stone, P.H., 1998) (UNEP: Romanovsky, V.E. et al, 2008, *Frozen Ground*, The Global Outlook for Ice and Snow, United Nations Environment Programme )

De avgörande faktorerna för permafrostens degradering är framförallt temperatur, nederbörd, vegetation och markens hydrologi (Romanovsky *et al*, 2008). I nuläget finns det ingen klimatmodell som tar hänsyn till dessa faktorer och permafrostens degradering kan således inte beräknas exakt. Dock kan ett framtida klimatscenario antas tillsammans med förväntade förändringar i vegetationstäckning/markhydrologi och permafrostens framtida temperaturförändring således projiceras (se *Figur 6*).

Som nämnt tidigare är det inte bara temperatur utan även nederbörd, vegetation och hydrologi som avgör permafrostens degradering. Jorgenson *et al* (2001) menar att det tjockare snötäcke, som är ett resultat av ökad nederbörd till följd av ökad lufttemperatur, ska ha bidragit till permafrostdegraderingen i centrala Alaska då det isolerar permafrosten från den kalla luften. Flera simuleringar visar att snödjupet har stor inverkan på temperaturen i marken (Jorgenson *et al*, 2001).

Även bränder spelar roll i permafrostens degradering då de eliminerar det skyddande vegetationstäckningen ovan jord och på så sätt bidrar till en ökad medeltemperatur i marken (Swanson, 1996). Dock menar Jorgenson *et al* (1999) att bränder inte är det huvudsakliga hotet mot permafrost då deras studie i Alaska visar på en låg korrelation mellan bränder och permafrostdegradering. Då bränder ökar i frekvens vid varmare och torrare klimat kan de dock utgöra ett större hot för permafrosten vid ett framtida varmare klimat (Jorgenson *et al*, 2001).

Effekten av grundvatten på permafrost är ännu inte helt känd. En studie av Racine och Walters (1994) i Tanana Flats, Alaska, visar dock att grundvattnet i diskontinuerlig permafrost kan bidra till permafrostdegradering då dess temperatur ligger på 2-4°C året runt och rör sig i komplexa system över, under och inuti den diskontinuerliga permafrosten.

Den framtida klimatförändringen över Arktis kommer med stor sannolikhet förändra vegetationstäckningen i regionen. Framförallt tros lövfällande buskar få allt större utbredning (Walker *et al*, 2006). Då busktäckningen har relativt lågt albedo kommer det att absorbera mer värmestrålning från solen (Blok *et al*, 2009) och på så vis bidra till den regionala uppvärmningen (Eugster *et al*, 2000). Dock behöver inte en högre lufttemperatur tvunget bidra till förändring i marktemperatur (Blok *et al*, 2009). Tvärtom visar en studie av Blok *et al* (2009) att ett ökande vegetationstäckning i form av lövfällande buskar skuggar marken och på så sätt håller marktemperaturen låg. Vidare kan detta ge en negativ återkoppling på den globala uppvärmningen under

sommarhalvåret då marken är kallare, respirationen avtar och mindre koldioxid släpps ut i atmosfären.

### 3.4 Metangas och kolreservoarer

#### 3.4.1 Metangas

Metangas (CH<sub>4</sub>) är den växthusgasen som har tredje störst påverkan på växthuseffekten efter vattenånga (H<sub>2</sub>O) och koldioxid (CO<sub>2</sub>) (Heimann, 2010). Metangas har ett GWP<sup>\*2</sup> (*Global Warming Potential*) på 23 (Anisimov och Reneva, 2006) och en beräknad livslängd i atmosfären på ca 8-12 år (Wahlen, 1993). Detta innebär att ett kg CH<sub>4</sub> i atmosfären har samma uppvärmande effekt som 23 kg CO<sub>2</sub> på en 100-årsperiod. Idag ligger CH<sub>4</sub>-koncentrationen i atmosfären på ca 1750 ppb (miljarddelar) (Reay, 2006) och ökar årligen med ca 1%. Ungefär 40% av metangasutsläppen till atmosfären är naturliga (Heimann, 2010) vilket är ca 250 miljoner ton kol i årliga utsläpp (Reay, 2006). Av de naturliga utsläppen utgörs ca 80% av anaerob nedbrytning av organiskt material i våtmarker (Reay, 2006).

#### 3.4.2 Metancykeln

Den dominerande källan för naturliga metangasutsläpp är som tidigare nämnt våtmarker men det förekommer även utsläpp från termiter, metanhydrater och hav (Reay, 2006). En nyare studie av Keppler *et al* (2006) visar även på att vegetation skulle vara en metankälla och stå för en tredjedel av det naturliga metangasutsläppet. Om detta stämmer innebär det att det uppskattade utsläppet från våtmarker (80%) är överskattat. Det finns även artificiella metangaskällor som bland annat innefattar idisslande djur, risodlingar, kolbrytning, deponier och ofullständig förbränning av biobränsle (Reay, 2006). De årliga utsläppen från antropogena och naturliga metangaskällor presenteras i *Tabell 1*.

**Tabell 1** Årliga metangasutsläpp från antropogena och naturliga källor

Antropogena källor (Tg CH <sub>4</sub> /år)	
Idisslare	189 <sup>a</sup>
Risodling	112
Kolbrytning	48 <sup>b</sup>
Förbränning av biobränsle	43
Gas-/oljeindustri	36
Naturliga källor (Tg CH <sub>4</sub> /år)	
Våtmarker	145
Termiter	23

<sup>a</sup> Inkluderar utsläpp från deponier och avfall

<sup>b</sup> Inkluderar naturgasutsläpp (IPCC: Denman, K.L. *et al*, 2007)

<sup>\*2</sup> "En ranking av absorptionsförmågan hos de primära växthusgaserna uttryckt som atmosfärisk uppvärmningseffekt för var och en jämfört med koldioxid, som har värdet 1." (Allaby, A. and Allaby, M., 2003)

När CH<sub>4</sub> reagerar med hydroxid (OH) i atmosfären bildas det CO<sub>2</sub> och CO (kolmonoxid) (CarboScope, 2009). Denna reaktion är den främsta metansänkan och representerar ca 95% (511 Gt (10<sup>9</sup> t) CH<sub>4</sub>/år) av den totala förlusten av CH<sub>4</sub> i atmosfären. Resterande 5% (30 Gt CH<sub>4</sub>/år) tas upp av mikroorganismer i jordar, vid reaktion med klor i hav samt andra reaktioner i atmosfären (Denman *et al*, 2007).

### 3.4.3 Kolreservoarer

Den arktiska jorden innehåller ca 14% av den kol som finns lagrad i jord globalt vilket motsvarar ungefär 455 Gt (Gorham, 1991). Det kol som finns lagrat i våtmarker, permafrost på land samt permafrost under det arktiska havet motsvarar ungefär dubbelt så stor mängd kol som det som finns som koldioxid i atmosfären idag (Heimann, 2010).

Metanhydrater är en frusen förening som består av en CH<sub>4</sub>-molekyl som är omgiven av vattenmolekyler (McGuire, 2009). De bildas under väldigt specifika förhållanden och det krävs låg temperatur, högt tryck samt stor tillgång på gas och vatten vilket ofta hittas på land i arktiska miljöer (Judd *et al*, 2002). Så länge det inte sker en förändring i temperatur eller tryck förblir metanhydraterna stabila.

Den geografiska utbredningen och mängden av metanhydrater varierar stort. Dock anses metanhydrater vara den största reservoaren av kol, bundet som CH<sub>4</sub>, i världen (Judd *et al*, 2002). Tidigare uppskattningar av metanhydratreservoarernas kolinnehåll visar på något högre siffror än nyare uppskattningar. Goritz och Fung (1994) uppskattning på reservoarernas innehåll låg på ca 8-400 Gt kol (McGuire, 2009) medan Kvenvolden (1999) menade att det istället var ca 700 Gt. En nyare uppskattning av McGuire *et al* (2007) visar istället att reservoarerna innehåller ca 5-195 Gt kol, det vill säga minst hälften av tidigare uppskattningar.

### 3.4.4 Yedoma

Yedomajorden består av vindburet sedimentmaterial, så kallat ”loess”, och täcker en total yta på över 1 miljon km<sup>2</sup> i centrala Alaska och norra Sibirien (Zimov *et al*, 2006). Jorden härstammar från sen Pleistocen<sup>\*3</sup> (Kuhry *et al*, 2009) och i den finns stora delar gräsrötter och djurben som bidrar till dess ovanligt höga kolinnehåll. Frusen Yedoma i Sibirien och Alaska har därför en kolhalt på ca 2-5 %, vilket är ungefär 10-30 gånger högre än andra, ofrusna mi-

\*3 ”Geologisk tidsepok omfattande 2,6 miljoner år till ca 11 500 år före nutid” (Nationalencyklopedin)

neraljordar (Zimov *et al*, 2006). Yedomajorden är extra känslig för en temperaturökning då den är väldigt lättnedbruten och 30% av utsläppen är metangas (Kintisch, 2009).

## 4 Resultat

Vid en temperaturhöjning till följd av den globala uppvärmningen frigörs markbundet kol via tilltagande mikrobiell nedbrytning av organiskt material (Schuur *et al*, 2008). Den mikrobiella nedbrytningen är beroende av temperatur, markfuktighet, näringstillgång samt syrehalt. Det är när syretillgången är låg, eller till och med obefintlig, som CH<sub>4</sub> börjar bildas genom anaerob nedbrytning. När permafrost tinar, till följd av ett varmare klimat, och bildar ett blötare landskap ökar alltså metangasutsläppen till atmosfären på grund av ökad anaerob nedbrytning (McGuire, 2009). Enligt Denman *et al* (2007) bidrar den arktiska regionen med 15-50 Tg (10<sup>12</sup> g) CH<sub>4</sub> per år till atmosfären (McGuire, 2009).

### 4.1 Historiska och nutida utsläpp

Under den senaste avisningen tinade den södra delen av Yedomajordarna av vilket frigjorde stora mängder växthusgas (Walter *et al*, 2007). Walter *et al* (2006) uppskattar att nedbrytning från Yedomajord under sibiriska termokarstsjöar<sup>\*4</sup> släppte ut ca 3.7 Tg CH<sub>4</sub> per år under hela Holocenepoken<sup>\*5</sup>. Smith *et al* (2005) menar att under de senaste århundradena har uppvärmningen av den diskontinuerliga permafrosten i Arktis bidragit till en ökad frekvens och storlek på termokarstsjöar. Enligt Walter *et al* (2006) ökade termokarstsjöarnas area med 14% på ett 12000 km<sup>3</sup> stort permafrostområde i Ryssland mellan 1974 och 2000. En liknande studie gjord av Smith *et al* (2005) visar på en motsvarande ökning på 12% i västra Sibirien under samma period. Vidare beräkningar av Walter *et al* (2006) visar att denna ökning motsvarade en förhöjning i CH<sub>4</sub>-utsläpp på 58% (motsvarande 1,4 Tg CH<sub>4</sub>/år) under denna period.

Trots att den arktiska regionen anses vara en källa för CH<sub>4</sub> menar Bousquet *et al* (2006) att våtmarker på nordligare latituder genomgått en uttorkande trend sedan 1999 och att utsläppen därför minskat något.

<sup>\*4</sup> ”Grund sjö som bildas vid av tinande av permafrost” (Strahler, A. and Strahler, A., 2006)

<sup>\*5</sup> ”Geologisk epok som började vid senaste istidens slut för ca 11 500 år sedan och sträcker sig till nutiden.” (Nationalencyklopedin)

## 4.2 Framtida utsläpp

En uppskattning gjord av Gruber *et al* (2004) visar att ungefär 100 Gt kol kommer att släppas ut från tinande permafrost innan år 2100 (Schuur *et al*, 2008) och Lawrence *et al* (2005) menar att med de värsta projektionerna kommer all Yedomajord att tina inom samma tidsförlopp (Zimov *et al*, 2006). Denna siffra motsvarar ungefär 20% av Arktis totala kolbudget. Vidare studier av Tarnocai *et al* (2006) visar att om medeltemperaturen i Kanada ökar med 4°C skulle 48 Gt kol frigöras (Schuur *et al*, 2008) och om 10% av permafrosten i Sibirien töade till 5°C är motsvarande utsläpp 40 Gt (Dutta *et al*, 2006).

Utifrån SRES A2-scenario (*se Bilaga*) beräknar Khvorostyanov *et al* (2008) att den Sibiriska Yedomajorden kommer att släppa ut 0,05 kg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>år de påföljande 250 åren efter år 2050. Totalt motsvarar detta, för hela Yedoma-området, ett kolutsläpp på 1 Gt/år i CO<sub>2</sub>-ekvivalenter<sup>\*6</sup>. Detta motsvarar en sjättedel av det årliga antropogena koldioxidutsläppen på 8,7 Gt C/år (Global Carbon Project, 2010).

Enligt ACIA är osäkerheten i CH<sub>4</sub>-utsläpp från metanhydrater större då det krävs en intensivare uppvärmning och längre tid för dessa att tina. Dock kvarstår faktum att utsläppen blir stora om det väl sker (ACIA, 2004b). Enligt Archer (2007) skulle ett utsläpp på 50 Gt CH<sub>4</sub> från metanhydrater under de kommande 100 åren medföra att koncentrationen av CH<sub>4</sub> i atmosfären fördubblas (Archer, 2007).

## 4.3 Konsekvenser

Heimann (2010) menar att de CH<sub>4</sub>-utsläpp som sker från den norra hemisfären är negligerbara i den globala metancykeln jämfört med det totala utsläppet CH<sub>4</sub> per år, men menar också att kvantiteten på framtidens utsläpp är osäkra. Faktum kvarstår dock att koncentrationen CH<sub>4</sub> i atmosfären ökar och att CH<sub>4</sub> har en 15% stor inverkan på växthuseffekten relativt andra växthusgaser (CO<sub>2</sub> har 60%) (Rodhe, 1990).

Metanhydrater är en väldigt stor energikälla jämfört med många andra kolväten; endast en tusendel av den totala budgeten (*se kap 4.4*) hade räckt för att täcka den årliga globala energiförbrukningen (Volker *et al*, 2009). Volker *et al* (2009) menar att ”förebyggande exploate-

---

<sup>\*6</sup> ”Ett mått som används för att jämföra utsläpp från olika växthusgaser baserat på deras Global Warming Potential (GWP) ... Koldioxidekvivalenten för en gas erhålls genom att multiplicera antalet ton av gasen med dess GWP.” (EPA)



ring” av metanhydrater är en möjlighet att bromsa framtida utsläpp samtidigt som det ger en energikälla med hög kvalitet.

## 5 Diskussion och slutsatser

Problemet kring den arktiska permafrostens degradering anser jag bestå av två essentiella faktorer. För det första är det just den arktiska regionen som förmodas genomgå den mest intensiva uppvärmningen de kommande åren och för det andra innehåller området en sjundedel av jordens totala kolbudget; kol som dessutom är ovanligt lättnedbrutet. Dessa två faktorer skapar alltså tillsammans en eskalerande, positiv återkopplingsprocess.

När det gäller den arktiska permafrostens degradering är forskarna överens om att den i framtiden kommer att bli allt mer tilltagande på grund av den globala uppvärmningen. Dock bör det tas i beaktning att det främst är den diskontinuerliga permafrosten som är hotad då den inte är lika tjock och alltså påverkas lättare än den kontinuerliga permafrosten (Jorgenson *et al*, 2001). Då endast 17% av permafrosten i den arktiska regionen är diskontinuerlig, och en fjärdedel av denna tros tina vid en temperaturökning på 2°C (Anisimov och Nelson, 1996), är det alltså en minoritet av den totala permafrosten som är utsatt för det största hotet. Trots detta visar en amerikansk klimatmodell att hela 23% av den totala permafrosten kommer att tina innan år 2080 (Anisimov och Reneva, 2006). Då den kontinuerliga permafrosten är väldigt tjock är det föga troligt att den skulle vara inkluderad i dessa 23% då det krävs betydligt mer än 70 år för denna att tina (Geological Survey of Canada, 2007).

Det är främst den globala temperaturförändringen som påverkar permafrostens degradering. Dock måste även de regionala förändringarna i bland annat nederbörd, hydrologi och vegetation beaktas. Än så länge finns det ingen klimatmodell som tar med dessa faktorer i beräkningarna för permafrostens degradering vilket utgör en ökad osäkerhet i projiceringar för framtiden. Meningarna om huruvida en ökad markvegetation påverkar permafrosten skiljer sig lite åt. Eugster *et al* (2000) menar att en ökad markvegetation, med sitt låga albedo, skulle verka uppvärmande på marken medan Blok *et al* (2009) menar att ökad markvegetation istället skulle skugga marken och verka avkylande. Det är svårt att säga vilken av dessa två teorier som är mest trolig i ett längre tidsperspektiv och just därför hade en klimatmodell som väger in dessa övriga regionala faktorer gett en säkrare projicering över framtida permafrostdegradering.

Idag anses inte bränder ha någon större inverkan på permafrostens degradering då brandfrekvensen är väldigt låg i permafrostområden. Dock finns det ett medvetande om att ett varmare klimat skulle kunna öka frekvensen av bränder. Då bränder sker sporadiskt eller vid yttre påverkan av människor är det förmodligen svårt att inkludera dessa som en faktor i en modell. Dock bör dess ökade frekvens fortfarande tas i beaktning, framförallt om det skulle visa sig att Blok *et al* (2009) teori om att vegetationstäckets skyddar permafrosten stämmer.

När det gäller metangasutsläpp så är det endast 40% av det totala utsläppet som kommer ifrån naturliga källor; resten är antropogena utsläpp. Visserligen så kommer större delen av de naturliga utsläppen ifrån våtmarker, det vill säga resultatet av tinande permafrost, men i den stora metacykeln med antropogena utsläpp inräknat så är det största metanhotet just antropogent. Detta kan till exempel illustreras med att risodlingar och idisslare tillsammans är en dubbelt så stor metankälla som våtmarker (Denman, K.L. *et al*, 2007). Det innebär inte att hotet från tinande permafrost är negligerbart, men det bör heller inte anses vara ett större hot än det vi själva utgör. Å andra sidan hade de naturliga utsläppen ansetts vara desto större om vi släppt ut mindre antropogen metangas än vad vi gör i vårt kommersiella samhälle idag. Hotet från tinande permafrost är helt enkelt olika beroende på hur det sätts i relation till omvärlden.

Metacykeln består som nämnt inte bara av utsläpp utan även av upptag, bland annat i atmosfären. Vid en första anblick kan det verka bra att metangasens reaktion med hydroxid i atmosfären bidrar till en sänka på 511 Gt CH<sub>4</sub> per år (Denman *et al*, 2007) men faktum är att sänkan bidrar till en ny växthusgaskälla i form av koldioxid. Koldioxid är visserligen inte en lika stark växthusgas som metangas är men har å andra sidan en mycket längre livslängd i atmosfären. Det finns alltså ingen större process som tar bort metangas ur atmosfären utan endast en större process som mildrar förloppet.

Trots att de flesta studier visar på ett ökande utsläpp av metangas från den arktiska regionen i framtiden så finns det även studier som visar på motsatsen. Bousquet *et al* (2006) menade till exempel att Arktis har genomgått en uttorkande period sedan 1999 och att metangasutsläppen därför minskat något. Oavsett om detta stämmer eller ej, och om en liknande trend kommer att ses i framtiden, så får det inte glömmas bort att denna jord fortfarande är väldigt kolrik. Detta medför att en uppvärmning, som påskyndar den mikrobiella nedbrytningen, istället kommer att öka utsläppen av koldioxid.

Det finns flera olika tekniker som kan tillämpas vid mätandet av metanfluxer. Dessa har inte diskuterats närmare i rapporten (av avgränsande skäl) men har visat sig ge olika resultat. Det är helt enkelt svårt att mäta och bedöma storlek på kolreservoarer och metangasutsläpp. Detta kan exemplifieras av att uppskattandet av metanhydratreservoarer ligger inom intervallet 5-195 Gt kol (McGuire *et al*, 2007) vilket innebär en stor osäkerhet och medför även att riskerna med ett frigörande av denna metangas är väldigt osäkra.

Vidare, när det gäller metanhydrater, är dessa mycket svårare att tina och kunskapen är inte lika stor om denna process. Däremot vet man att om metanhydraterna väl börjar tina så kommer utsläppen att bli enorma. Volker *et al* (2009) har diskuterat möjligheten att börja exploatera metanhydrater för energiförsörjning då metanhydrater är en otroligt stor energikälla. Frågan är bara om det är värt riskerna. För det första så bidrar metanhydrater till stabilitet på havsbotten. Skulle denna stabilitet försvinna vid en förgasning av hydraterna är risken stor för skred i havsbotten som i sin tur leder till tsunamis. Den andra, och kanske för sammanhanget mer väsentliga, risken är helt enkelt oönskade utsläpp vid en exploatering. Med erfarenhet av bland annat oljekatastrofen i Mexikanska Golfen anser jag att vi i framtiden snarare borde vara mer försiktiga med att fundera över möjligheten att exploatera ytterligare en typ av fossilt bränsle.

Följande slutsatser är dragna utifrån resultatet:

- 1) Den globala medeltemperaturen förväntas öka de närmsta 100 åren och uppvärmningen förväntas bli störst (3-5 °C) över den arktiska regionen
- 2) 23 % av den totala permafrosten i den arktiska regionen förväntas till följd av detta att tina inom samma tidsperiod. Detta uppskattas i sin tur att leda till:
- 3) Ett utsläpp till atmosfären omfattande ca 100 Gt kol

## 6 Referenslista

### 6.1 Tryckta källor

- Allaby, A. och Allaby, M., 2003, *Dictionary of: Earth Science*, Oxford University Press, New York, p. 236
- Anisimov, O.A. och Nelson, F.E., 1996, *Permafrost Distribution in the Northern Hemisphere Under Scenarios of Climatic Change*, Elsevier
- Anisimov, O.A. och Reneva, S., 2006, *Permafrost and Changing Climate: The Russian Perspective*, Royal Swedish Academy of Science
- Archer, D., 2007, *Methane Hydrate Stability and Anthropogenic Climate Change*, Biogeoscience, Copernicus GmbH, University of Chicago, Department of Geophysical Science, USA
- Blok, D, Heijmans, M.M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. och Berendse, F., 2009, *Shrub Expansion May Reduce Summer Permafrost Thaw in Siberian Tundra*, Global Change Biology, Blackwell Publishing Ltd
- Bousquet, P., Ciais, P., Miller, J.B., Dlugokencky, E.J., Hauglustaine, D.A., Prigent, C., Van der Werf, G.R., Peylin, P., Brunke, E.G., Carouge, C., Langenfelds, R.L., Lathi re, J., Papa, F., Ramonet, M., Schmidt, M., Steele, L.P., Tyler, S.C. och White, J., 2006, *Contribution of Anthropogenic and Natural Sources to Atmospheric Methane Variability*, Nature, Nature Publishing Group
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy och X. Zhang, 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Dutta, K., Schuur, E.A.G, Neff, J.C och Zimov, S.A, 2006, *Potential Carbon Release from Permafrost Soils of Northeastern Siberia*, Global Change Biology, Blackwell Publishing, Russian Academy of Science, Russia
- Eugster, W., Rouse, W.R., Pielke, R.A., McFadden, J.P., Baldocchi, D.D., Kittel, T.G.F., Chapin III, F.S., Liston, G.E., Vidale, P.L., Vaganov, E. och Chambers, S., 2000, *Land-atmosphere Energy Exchange in Arctic Tundra and Boreal Forest: Available Data and Feedbacks to Climate*, Global Change Biology
- Gorham, E., 1991, *Northern Peatlands: Role in The Carbon Cycle and Probable Responses to Climate Warming*, Ecological Applications, Ecological Society of America
- Goritz, V. och Fung, I., 1994, *Potential Distribution of Methane Hydrate in the World's Ocean*, Global Biogeochemical Cycles
- Heimann, M., 2010, *How Stable is the Methane Cycle?*, Science, AAAS, Max-Planck-Institut f r Biogeochemie, Germany
- Jorgenson, M.T., Roth, J.E., Reynolds, M.K., Smith, M.D. och Lentz, W., 1999, *An Ecological Land Survey for Fort Wainwright, Alaska*, CRREL Report, US Army Corps of Engineers
- Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. och Osterkamp, T.E, 2001, *Permafrost Degradation and Ecological Changes Associated with a Warming Climate in Central Alaska*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands
- Judd, A.G., Hovland, M., Dimitrov, L.I., Garcia Gil, S., Jukes, V., 2002, *The Geological Methane Budget at Continental Margins and its Influence on Climate Change*, Geofluids, Blackwell Science Ltd

- Keppler, F., Hamilton, J.T.G., Brass, M. och Röckmann, T., 2006, *Methane Emissions from Terrestrial Plants Under Aerobic Conditions*, Nature, Nature Publishing Group
- Kintisch, E., 2009, *Projections of Climate Change Go From Bad to Worse*, *Scientist Report*, Science, AAAS
- Khvorostyanov, D.V., Ciais, P., Krinner, G., Zimov, S.A., Corradi, Ch. And Guggenberger, G., 2008, *Vulnerability of Permafrost Carbon to Global Warming. Part II: Sensitivity of Permafrost Carbon Stock to Global Warming*, Tellus, Blackwell Publishing Ltd
- Kuhry, P., Ping, C.L., Tarnocai, C., Schuur, E.A.G. och Zimov, S., 2009, *Report From the International Permafrost Association: Carbon Pools in Permafrost Regions*, Permafrost and Periglacial Processes, Wiley Kvenvolden, K.A., 1999, *Potential Effects of Gas Hydrates on Human Welfare*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, National Academy of Science of the United States of America
- Lemke, P., J. Ren, R.B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R.H. Thomas and T. Zhang, 2007: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- McGuire, A.D., Chapin III, F.S., Wirth, C., Apps, M., Bhatti, J., Callaghan, T., Christensen, T.R., Clein, J.S., Fukuda, M., Maximov, T., Onuchin, A., Shvidenko, A. och Vaganov, E., 2007, *Responses of High Latitude Ecosystems to Global Change: Potential Consequences for the Climate System*, Terrestrial Ecosystems in a Changing World, The IGBP Series, Berlin, Germany
- McGuire, A.D., Anderson, L.G., Christensen, T.R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D.J., Heimann, M., Lorenson, T.D., Macdonald, R.W. och Roulet, N., 2009, *Sensitivity of the Carbon Cycle in the Arctic to Climate Change*, Ecological Monographs, Ecological Society of America
- Nacic´enovic´, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., von Rooijen, S., Victor, N. och Dadi, Z., 2000, *Special Report on Emission Scenarios*, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Racine, C.H. och Walters, J.C., 1994, *Groundwater Discharge Fens in the Tanana Lowlands, Interior Alaska, USA*, Arctic and Alpine Research, INSTAAR, University of Colorado
- Rodhe, H., 1990, *A Comparison of the Contribution of Various Gases to the Greenhouse Effect*, Science, AAAS,
- Romanovsky, V.E (Huvudförfattare), Gruber, S., Jin, H., Marchenko, S.S., Smith. S.L., Trombotto, D. och Walter, K.M., 2008, *Frozen Ground*, The Global Outlook for Ice and Snow, United Nations Environment Programme,
- Schuur, E., Bockheim, J., Canadell, J.G., Euskirchen, E., Field, C.B., Goryachkin, S.V., Hagemann, S., Kuhry, P., Lafleur, P.M., Lee, H., Mazhitova, G., Nelson, F.E., Rinke, A., Romanovsky, V.E., Shiklomanov, N., Tarnocai, C., Venevsky, S., Vogel, J.G. och Zimov, S.A., 2008, *Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle*, BioScience
- Smith, L.C., Sheng, Y., MacDonald, G.M. och Hinzman, L.D., 2005, *Disappearing Arctic Lakes*, Science, AAAS

- Sokolov, A.P. och Stone, P.H., 1998, *A Flexible Climate Model for use in Integrated Assessments*, Climate Dynamics, Springer
- Strahler, A. och Strahler, A., 2006, *Glossary*, Ed. Correa, J. et al, *Introducing Physical Geography: Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., USA, s. 699
- Swanson, D.K., 1996, *Susceptibility of Permafrost Soils to Deep Thaw after Forest Fires in Interior Alaska, U.S.A., and Some Ecologic Implications*, Arctic and Alpine Research, INSTAAR, University of Colorado
- Tarnocai, C., 2006, *The Effect of Climate Change on Carbon in Canadian Peatlands*, Global and Planetary Change, Elsevier Science Publishers B.V
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden och P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Volker, K., Canadell, J.G., Nakicenovic, N., Abe, Y., Andruleit, H., Archer, D., Grubler, A., Hamilton, N.T.M., Johnson, A., Kostov, V., Lamarque, J-F., Langhorne, N., Nisbet, E.G., O'Neill, B., Riahi, K., Riedel, M., Wang, W. och Yakushev, V., 2009, *Gas Hydrates: Entrance to a Methane Age or Climate Threat?*, Environmental Research Letters, IOP Publishing Ltd, UK
- Wahlen, M., 1993, *The Global Methane Cycle*, Annual Review of Earth and Planetary Science, Annual Reviews, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, California
- Walker, M.D., Wahren, C.H., Hollister, R.D., Henry, G.H.R., Ahlquist, L.E., Alatalo, J.M., Bret-Harte, M.S., Calef, M.P., Callaghan, T.V., Carroll, A.B., Epstein, H.E., Jonsdottir, I.S., Klein, J.A., Magnusson, B., Molau, U., Oberbauer, S.F., Rewa, S.P., Robinson, C.H., Shaver, G.R., Suding, K.N., Thompson, C.C., Tolvanen, A., Totland, Ö., Turner, P.L., Tweedie, C.E., Webber, P.J. och Wookey, P.A., 2006, *Plant Community Responses to Experimental Warming across the Tundra Biome*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, National Academy of Science
- Walter, K.M., Zimov, S.A., Chanton, J.P., Verbyla, D. och Chapin III, F.S., 2006, *Methane Bubbling From Siberian Thaw Lakes as a Positive Feedback to Climate Warming*, Nature, Nature Publishing Group
- Walter, K.M., Edwards, M.E., Grosse, G., Zimov, S.A. och Chapin, F.S., 2007, *Thermokarst Lakes as a Source of Atmospheric CH<sub>4</sub> During the Last Deglaciation*, Science, AAAS, Washington DC
- Zimov, S.A., Schuur, E.A.G och Chapin III, F.S., 2006, *Permafrost and the Global Carbon Budget*, Science, AAAS

## 6.2 Elektroniska källor

- Arctic Climate Impact Assessment, *Finding 1*, [Online], 2004a, Tillgänglig: <http://amap.no/acia/> [Hämtad: 2010, April 13]
- Arctic Climate Impact Assessment, *Finding 2*, [Online], 2004b, Tillgänglig: <http://amap.no/acia/> [Hämtad: 2010, April 13]
- CarboScope, *The Methane Cycle*, [Online], 2009, Tillgänglig: [http://www.carboscope.eu/index.php?p=ch4\\_sb&rub=r14&smenu=smenuInfo1](http://www.carboscope.eu/index.php?p=ch4_sb&rub=r14&smenu=smenuInfo1) [Hämtad 2010, April 13]

- Geological Survey of Canada, *Permafrost*, [Online], 2007, Tillgänglig: [http://cgc.rncan.gc.ca/permafrost/climate\\_e.php](http://cgc.rncan.gc.ca/permafrost/climate_e.php) [Hämtad 2010, April 13]
- Geological Survey of Canada, *Permafrost*, [Online], 2007, Tillgänglig: [http://cgc.rncan.gc.ca/permafrost/whatis\\_e.php](http://cgc.rncan.gc.ca/permafrost/whatis_e.php) [Hämtad 2010, April 13]
- Global Carbon Project, *Carbon Budget Highlights*, [Online], 2010, Tillgänglig: <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/08/hl-full.htm> [Hämtad 2010, Maj 18]
- Hassol, S. J., *Executive Summary*, [Online], 2004, Arctic Climate Impact Assessment, [Online], Cambridge University Press, Cambridge, Tillgänglig: <http://amap.no/acia/> [Hämtad: 2010, April 13]
- International Permafrost Association, *What is permafrost?*, [Online], 2010, Tillgänglig: <http://ipa.arcticportal.org/index.php/what-is-permafrost.html#> [Hämtad 2010, April 13]
- Nationalencyklopedin, [Online], 2010, Tillgänglig: <http://www.ne.se/holocen> [Hämtad 2010, Maj 07]
- Nationalencyklopedin, [Online], 2010, Tillgänglig: <http://www.ne.se/pleistocen> [Hämtad 2010, Maj 27]
- Reay, D. (Huvudförfattare); Hughes, P. (Ämnesredaktör), *Methane*, [Online], 2006, Encyclopedia of Earth, Eds. Cutler, J., Cleveland Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Tillgänglig: <http://www.eoearth.org/article/Methane> [Hämtad 2010, April 13]
- United States Environmental Protection Agency, *Glossary of Climate Change Terms*, [Online], 2009, Tillgänglig: <http://www.epa.gov/climatechange/glossary.html#C> [Hämtad 2010, Maj 19]

### 6.3 Figurer

- Arctic Climate Impact Assessment, *Finding 1*, [Online], 2004a, Tillgänglig: <http://amap.no/acia/> [Hämtad: 2010, April 13], s. 23, 28
- Romanovsky, V.E (Huvudförfattare), Gruber, S., Jin, H., Marchenko, S.S., Smith, S.L., Trombotto, D. och Walter, K.M., 2008, *Frozen Ground*, The Global Outlook for Ice and Snow, United Nations Environment Programme, s. 183, 187
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden och P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor och H.L. Miller (Redaktörer.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, s. 253

## **Bilaga**

### ***SRES A2:***

”A2:s scenariefamilj beskriver en väldigt heterogen värld. De grundläggande dragen är själv-tillit och bevarande av lokala identiteter. Regionala fertilitetsmönster konvergerar väldigt sak-ta, vilket resulterar i en fortsatt ökad global population. Den ekonomiska utvecklingen är hu-vudsakligen regional och den ekonomiska tillväxten per capita och den teknologiska föränd-ringen är långsammare och mer fragmenterad än i andra scenariefamiljer.” (Nakic´enovic´ *et al*, 2000)

### ***SRES B2:***

”B2:s scenariefamilj beskriver en värld där tonvikten ligger på lokala lösningar för ekono-misk, social och miljömässig hållbarhet. Det är en värld med kontinuerligt ökande global po-pulation i en lägre takt än A2, mellanliggande nivåer av ekonomisk utveckling, en långsam-mare och mer varierad teknologisk förändring än den i B1 och A1. Då scenariot också är in-riktat på miljöskydd och social rättvisa, fokuserar det på lokala och regionala nivåer.” (Na-kic´enovic´ *et al*, 2000)



Lunds Universitets Naturgeografiska institution. Seminarieuppsatser. Uppsatserna finns tillgängliga på Naturgeografiska institutionens bibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND. Serien startade 1985. Uppsatserna är även tillgängliga på <http://www.geobib.lu.se/>

The reports are available at the Geo-Library, Department of Physical Geography, University of Lund, Sölvegatan 12, S-223 62 Lund, Sweden.

Report series started 1985. Also available at <http://www.geobib.lu.se/>

111. Tränk, L., (2005): Kadmium i skånska vattendrag – en metodstudie i föroreningsmodellering.
112. Nilsson, E., Svensson, A.-K., (2005): Agro-Ecological Assessment of Phonxay District, Luang Phrabang Province, Lao PDR. A Minor Field Study.
113. Svensson, S., (2005): Snowcover dynamics and plant phenology extraction using digital camera images and its relation to CO<sub>2</sub> fluxes at Stordalen mire, Northern Sweden.
114. Barth, P. von., (2005): Småvatten då och nu. En förändringsstudie av småvatten och deras kväveretentionsförmåga.
115. Areskoug, M., (2005): Planering av dagsutflykter på Island med nätverkanalys
116. Lund, M., (2005): Winter dynamics of the greenhouse gas exchange in a natural bog.
117. Persson, E., (2005): Effect of leaf optical properties on remote sensing of leaf area index in deciduous forest.
118. Mjöfors, K., (2005): How does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration affect vegetation productivity?
119. Tollebäck, E., (2005): Modellering av kväveavskiljningen under fyra år i en anlagd våtmark på Lilla Böslid, Halland
120. Isacson, C., (2005): Empiriska samband mellan fältdata och satellitdata – för olika bokskogområden i södra Sverige.
121. Bergström, D., Malmros, C., (2005): Finding potential sites for small-scale Hydro Power in Uganda: a step to assist the rural electrification by the use of GIS
122. Magnusson, A., (2005): Kartering av skogsskador hos bok och ek i södra Sverige med hjälp av satellitdata.
123. Levallius, J., (2005): Green roofs on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefits.
124. Florén, K., Olsson, M., (2006): Glacifluviala avlagrings- och erosionsformer i sydöstra Skåne – en sedimentologisk och geomorfologisk undersökning.
125. Liljewalch-Fogelmark, K., (2006): Tågbuller i Skåne – befolkningens exponering.
126. Irminger Street, T., (2006): The effects of landscape configuration on species richness and diversity in semi-natural grasslands on Öland – a preliminary study.
127. Karlberg, H., (2006): Vegetationsinventering med rumsligt högupplösande satellitdata – en studie av QuickBird-data för kartläggning av gräsmark och konnektivitet i landskapet.
128. Malmgren, A., (2006): Stormskador. En fjärranalytisk studie av stormen Gudruns skogsskador och dess orsaker.
129. Olofsson, J., (2006): Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6000 years.
130. Johansson, T., (2006): Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i

- stormfällan efter stormen Gudrun med hjälp av satellitdata.
- 131 Eckeskog, M., (2006): Spatial distribution of hydraulic conductivity in the Rio  
Sucio drainage basin, Nicaragua.
- 132 Lagerstedt, J., (2006): The effects of managed ruminants grazing on the global  
carbon cycle and greenhouse gas forcing.
- 133 Persson, P., (2007): Investigating the Impact of Ground Reflectance on Satel-  
lite Estimates of Forest Leaf Area Index
- 134 Valoczi, P. (2007): Koldioxidbalans och koldioxidinnehållsimulering av barr-  
skog i Kristianstads län, samt klimatförändringens inverkan på skogen.
- 135 Johansson, H. (2007): Dalby Söderskog - en studie av trädarternas samman-  
sättning 1921 jämfört med 2005
- 137 Kalén, V. (2007): Analysing temporal and spatial variations in DOC concen-  
trations in Scanian lakes and streams, using GIS and Remote Sensing
- 138 Maichel, V. (2007): Kvalitetsbedömning av kväveretentionen i nyanlagda våt-  
marker i Skåne
- 139 Agardh, M. (2007): Koldioxidbudget för Högestad – utsläpp/upptag och åt-  
gårdsförslag
- 140 Peterz, S. (2007): Do landscape properties influence the migration of Ospreys?
- 141 Hendrikson, K. (2007): Småvatten och groddjur i Täby kommun
- 142 Carlsson, A. (2008): Antropogen påverkan i Sahel – påverkar människans ak-  
tivitet NDVI uppmätt med satellit.
- 143 Paulsson, R. (2008): Analysing climate effect of agriculture and forestry in  
southern Sweden at Högestad & Christinehof Estate
- 144 Ahlstrom, A. (2008): Accessibility, Poverty and Land Cover in Hambantota  
District, Sri Lanka. Incorporating local knowledge into a GIS based accessibil-  
ity model.
- 145 Svensson T. (2008): Increasing ground temperatures at Abisko in Subarctic  
Sweden 1956-2006
- 146 af Wåhlberg, O. (2008): Tillämpning av GIS inom planering och naturvård -  
En metodstudie i Malmö kommun.
- 147 Eriksson, E. och Mattisson, K. (2008): Metod för vindkraftslokalisering med  
hjälp av GIS och oskarp logik.
- 148 Thorstensson, Helen (2008): Effekterna av ett varmare klimat på fenologin hos  
växter och djur i Europa sedan 1950.
- 149 Raguz, Veronika (2008): Karst and Waters in it – A Literature Study on Karst  
in General and on Problems and Possibilities of Water Management in Karst in  
Particular.
- 150 Karlsson, Peggy (2008): Klimatförändringarnas inverkan på de svenska vägar-  
na.
- 151 Lyshede, Bjarne Munk (2008): Rapeseed Biodiesel and Climate Change Miti-  
gation in the EU.
- 152 Sandell, Johan (2008): Detecting land cover change in Hambantota district, Sri  
Lanka, using remote sensing & GIS.
- 153 Elgh Dalgren, Sanna (2008): vattennivåförändringar i Väneren och dess inver-  
kan på samhällsbyggnaden I utsatta städer
- 154 Karlgård, Julia (2008): Degrading palsa mires i northern Europe: changing  
vegetation in an altering climate and its potential impact on greenhouse gas  
fluxes.
- 155 Dubber, Wilhelm and Hedbom, Mari (2008) Soil erosion in northern Loa PDR  
– An evaluation of the RUSLE erosion model

- 156 Cederlund, Emma (2009): Metodgranskning av Klimatkommunernas lathund  
för inventering av växthusgasutsläpp från en kommun
- 157 Öberg, Hanna (2009): GIS-användning i katastrofdrabbade utvecklingsländer
- 158 Marion Früchtl & Miriam Hurkuck (2009): Reproduction of methane emissions  
from terrestrial plants under aerobic conditions
- 159 Florian Sallaba (2009): Potential of a Post-Classification Change Detection  
Analysis to Identify Land Use and Land Cover Changes. A Case Study in  
Northern Greece
- 160 Sara Odellius (2009): Analys av stadsluftens kvalitet med hjälp av geografiska  
informationssystem.
- 161 Carl Bergman (2009): En undersökning av samband mellan förändringar i fe-  
nologi och temperatur 1982-2005 med hjälp av GIMMS datasetet och klimat-  
data från SMHI.
- 162 Per Ola Olsson (2009): Digitala höjdmodeller och höjdsystem. Insamling av  
höjddata med fokus på flygburen laserskanning.
- 163 Johanna Engström (2009): Landskapets påverkan på vinden -sett ur ett vind-  
kraftperspektiv.
- 164 Andrea Johansson (2009): Olika våtmarkstypers påverkan på CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O och  
CO<sub>2</sub> utsläpp, och upptag av N<sub>2</sub>.
- 165 Linn Elmlund (2009): The Threat of Climate Change to Coral Reefs
- 166 Hanna Forssman (2009): Avsmältningen av isen på Arktis - mätmetoder, orsa-  
ker och effekter.
- 167 Julia Olsson (2009): Alpina trädgränsens förändring i Jämtlands- och Dalarnas  
län över 100 år.
- 168 Helen Thorstensson (2009): Relating soil properties to biomass consumption  
and land management in semiarid Sudan – A Minor Field Study in North Kor-  
dofan
- 169 Nina Cerić och Sanna Elgh Dalgren (2009): Kustöversvämningar och GIS  
- en studie om Skånska kustnära kommuners arbete samt interpolations-  
metodens betydelse av höjddata vid översvämningssimulering.
- 170 Mats Carlsson (2009): Aerosolers påverkan på klimatet.
- 171 Elise Palm (2009): Övervakning av gåsbete av vass – en metodutveckling
- 172 Sophie Rychlik (2009): Relating interannual variability of atmospheric CH<sub>4</sub>  
growth rate to large-scale CH<sub>4</sub> emissions from northern wetlands
- 173 Per-Olof Seiron and Hanna Friman (2009): The Effects of Climate Induced  
Sea Level Rise on the Coastal Areas in the Hambantota District, Sri Lanka - A  
geographical study of Hambantota and an identification of vulnerable ecosys-  
tems and land use along the coast.
- 174 Norbert Pirk (2009): Methane Emission Peaks from Permafrost Environments:  
Using Ultra-Wideband Spectroscopy, Sub-Surface Pressure Sensing and Finite  
Element Solving as Means of their Exploration
- 175 Hongxiao Jin (2010): Drivers of Global Wildfires — Statistical analyses
- 176 Emma Cederlund (2010): Dalby Söderskog – Den historiska utvecklingen
- 177 Lina Glad (2010): En förändringsstudie av Ivösjöns strandlinje
- 178 Erika Filppa (2010): Utsläpp till luft från ballastproduktionen år 2008
- 179 Karolina Jacobsson (2010): Havsisens avsmältning i Arktis och dess effekter
- 180 Mattias Spångmyr (2010): Global effects of albedo change due to urbanization
- 181 Emmelie Johansson & Towe Andersson (2010): Ekologiskt jordbruk - ett sätt  
att minska övergödningen och bevara den biologiska mångfalden?
- 182 Åsa Cornander (2010): Stigande havsnivåer och dess effekt på låglänta länder

- 183 Linda Adamsson (2010): Landskapsekologisk undersökning av ädellövkogen i Östra Vätterbranterna
- 184 Ylva Persson (2010): Markfuktighetens påverkan på tillväxten i Guvarp gran-skog
- 185 Boel Hedgren (2010): Den arktiska permafrostens degradering och metangasutsläpp